

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 1 日現在

機関番号：15301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K18020

研究課題名(和文)高温超電導変圧器を用いた小型・軽量・高効率の交流大電流電源の開発

研究課題名(英文) Development of a small and high efficient power source with an HTS transformer for supplying large AC current

研究代表者

七戸 希(Nanato, Nozomu)

岡山大学・自然科学研究科・准教授

研究者番号：80362953

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：高温超電導線は液体窒素温度・自己磁場下で200A以上の臨界電流を持っており、その通電特性を測定するには200Aを超える通電が可能な交流大電流電源が必要となる。しかしながら、市販の電源は一般に体積および重量が非常に大きく、設置場所の制約などの問題があり、このことが高温超電導機器開発の妨げとなっている。本研究では、高温超電導変圧器を用いた小型・軽量・高効率の交流大電流電源の開発を行い、1kAの出力が可能な電源を、市販電源と比べて1/25の体積・重量で実現することができた。

研究成果の概要(英文)：High temperature superconducting wires have generally critical current of over 200 A and therefore power supplies which can output large AC current are needed for measuring current conduction characteristics of the wires. However, commercial AC power supplies are generally very large and heavy, and are difficult to handle in ordinary laboratories. In this study, the authors developed a small and light AC power supply with a high temperature superconducting transformer. The power supply can output AC current of 1 kA and its size and weight are 1/25 of a commercial power supply.

研究分野：電気機器学，応用超電導工学，計測工学

キーワード：高温超電導 変圧器 交流電源 大電流

1. 研究開始当初の背景

低炭素社会の実現に貢献できる機器として、さらにはスマートグリッドの主要構成機器として高温超電導電力機器の実用化が期待されている。その機器開発のためには同機器に用いられる高温超電導線の通電特性を設計段階で十分把握しておく必要がある。同線は市販のものでも液体窒素温度・自己磁場下で 200A 以上の臨界電流を持っているため、通電特性を把握するための試験には 200A を超える通電が可能な大電流電源が必要となる。今後の同線の発展による臨界電流の向上を見越して 1kA_{peak} の通電を確保する場合、市販の特に交流電源では、一般に体積および重量が非常に大きく、設置場所の制約や設置後の移動の困難さなど利用性においてデメリットが大きい。このことが国内外において機器開発の妨げとなっている。

2. 研究の目的

本研究では、小型・軽量かつ高効率の交流大電流電源の開発を目的とし、単相高温超電導変圧器を用いた電源を構築することによりその実現を図った。本電源は同変圧器の一次側に小型の低電流電源を接続し、二次側にて大電流を通電できる構成である。電源の使用目的が超電導線材の特性把握であるため、二次側に接続される負荷インピーダンスは非常に小さい。よって、二次側は低圧・大電流、一次側は電源使用者が使用場所において十分確保できる電圧・電流にすればよい。

また、高温超電導変圧器を使用するうえで、常電導転移への対策をする必要がある。常電導転移とは、超電導線に電気抵抗が発生する現象であり、これにより電気抵抗発生部において過大なジュール発熱および温度上昇が生じ、超電導線が焼損するなどの事故が生じる場合がある。よって、常電導転移が生じた場合には、迅速に検出し、事故を防ぐことができる保護システムを搭載する必要がある。このシステムの開発も併せて行い、安全性が確保された小型・軽量の交流大電流電源を開発することが最終目的である。

3. 研究の方法

以下について、設計および実機の作製と検証を行った。

- (1) 小型・軽量・低損失の高温超電導変圧器の設計・作製
(鉄心量の最小化、巻線の巻き方および巻数の最適化、もれ磁場の最小化、鉄損の最小化)
- (2) 高温超電導変圧器の冷却容器の設計・作製
(容器サイズの最小化、冷却効率の最大化)
- (3) 通電試験の実施
(目標電流値の達成、電流波形ひずみの最小化)
- (4) 安全性の確保

(常電導転移検出・保護システムの開発)

4. 研究成果

(1) 単相高温超電導変圧器および電源

3章(1)(2)を考慮して、図1の構造および寸法の高温超電導変圧器を作製した。一次および二次巻線には、Bi2223 高温超電導線を用いた。一次巻線には液体窒素温度、自己磁場下で臨界電流が 70A のものを 1本 120 ターン、二次巻線には同臨界電流が 200A のものを 8 本束ねて 3 ターン巻いた。これにより、一次側 100V、25A_{peak}、二次側 2.5V、1kA_{peak} となる設計である。

両巻線とも、巻枠として GFRP ボビンを用いた。液体窒素温度においても熱収縮が小さく、交流磁場が印加されても渦電流が流れない(効率を下げない)非金属のためである。また、両巻線とも、円筒ソレノイド形状に巻き、同軸に組み合わせることで、巻線に印加される磁場およびもれ磁場が低減されるようにした。これにより、臨界電流の低下の抑制、交流損失の低減、磁気結合の向上を実現できるためである。なお、ボビンの直径は、巻かれた超電導線に加わる曲げ応力が許容値内に収まるように決めた。

鉄心は方向性電磁鋼帯を積層した U 字カットコアを用いることにより、もれ磁場および鉄損が低減されるようにした。

冷却容器には非導電性、断熱性および強度を考慮して、発泡倍率 30 倍の発泡スチロールを用いた。液体窒素にて巻線を冷却する際に、鉄心を室温空間に置く構造にするために、中心に円筒空間を設けた。これにより、巻線

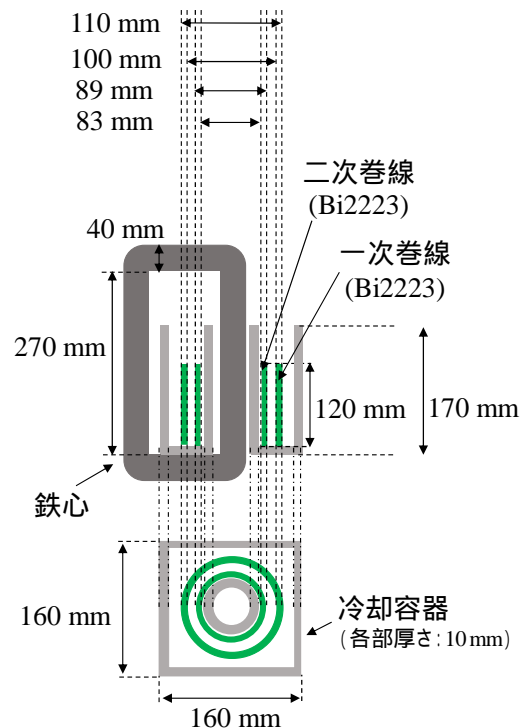


図1 高温超電導変圧器の構造と寸法

のみが冷却され、鉄心の冷却を避けられることから、鉄損の増加と冷却効率の低減を抑制することができる。

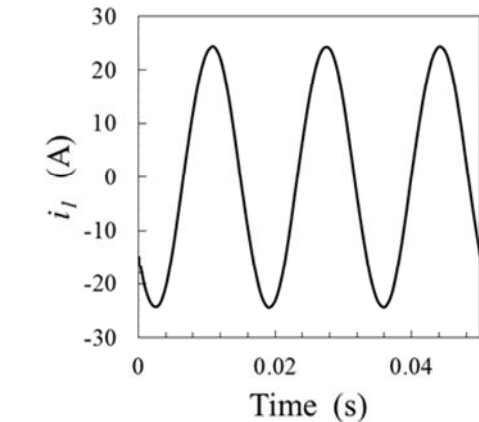
以上のように高温超電導変圧器を作製した。その重量は 12.6kg となった。

本変圧器の通電試験結果の一例を図 2 に示す。一次側にスライダック、二次側に $13\mu\Omega$ の抵抗を接続し、一次側に 60Hz, $25A_{peak}$ の電流を通電した結果である。波形にひずみが生じることなく $1kA_{peak}$ 出力電流が達成できていることがわかる。

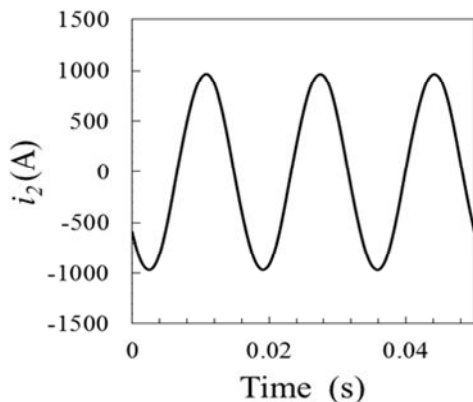
以上により開発された電源は、一次側に接続する電源の体積と重量、冷却用の液体窒素の重量も含めて、市販の 1kA 出力の電源と比べて、体積、重量ともに約 1/25 を達成した。

(2) 常電導転移検出・保護システム

研究代表者らはこれまでに、「有効電力法」という常電導転移検出方法を提案し、それに基づく保護システムの有効性を示している。本システムは、発生した電気抵抗を有効電力信号として検出し、その値が所定のしきい値に到達したときに通電電流を遮断してジュール発熱および温度上昇を抑えるものである。本研究において、高温超電導変圧器に適した方法となるようにこの有効電力法を改良し、本方法に基づいたシステムを構築した。



(a) 一次電流

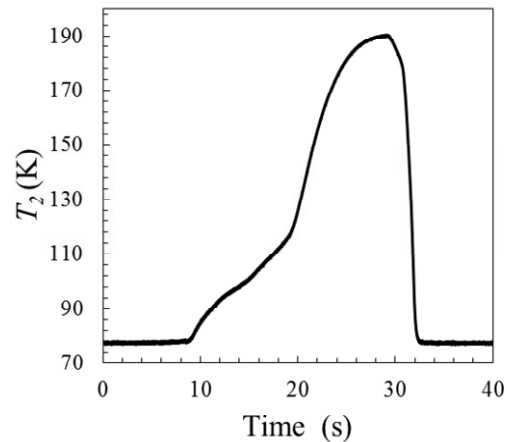


(b) 二次電流

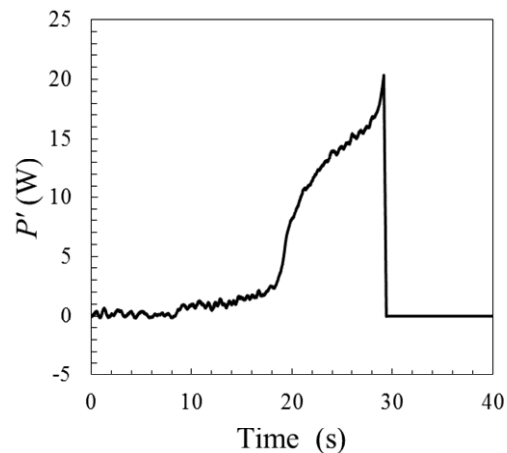
図 2 通電試験結果

図 3 に、本変圧器に意図的に常電導転移を発生させ、それを検出し保護を行った実験結果の一例を示す。二次側に $1kA_{peak}$ の電流を通電している状態で、二次巻線に取り付けたヒーターによって温度上昇させ、常電導転移を引き起こした。同図(a)はヒーター近傍の温度 T_2 であり、ヒーターにより常電導転移が生じ、約 9s から温度が上昇している。同図(b)はその際に計測された変圧器巻線の有効電力信号 P' である。電気抵抗が発生したことにより、約 9s から有効電力信号が発生している。本試験ではしきい値を 20W に設定した。同図(b)のように有効電力信号がしきい値 20W に到達したときに通電電流が遮断され、同時に有効電力信号が無くなり、同図(a)のように熱源が無くなったことから温度が低下している。このときの最高到達温度は 190K であった。巻線の許容温度 200K であるため、安全に保護できたことがわかる。つまり、適切なしきい値を定めることにより、最高到達温度を所定の温度以下に抑制できるシステムを構築することができた。

以上のように、安全性が確保された小型・軽量の交流大電流電源を開発することがで



(a) 二次巻線のヒーター近傍の温度



(b) 有効電力信号

図 3 常電導転移検出・保護試験結果

きた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 5 件)

N. Nanato, S. Nakamura, S. Tanaka, Detection of normal transitions in a hybrid single-phase Bi2223 high temperature superconducting transformer by using the active power method and a magnetic flux detection coil, Journal of Physics: Conference Series (JPCS) (2017), printed, 査読有

N. Nanato, K. Okura, H. Kumagai, H. Aoyama, Locating of normal transitions in a Bi2223 high temperature superconducting coil by using capacitor type voltage terminals and the active power method, Journal of Physics: Conference Series (JPCS) (2017), printed, 査読有

N. Nanato, N. Kishi, Y. Tanaka, M. Kondo, Basic study for a large AC current supply with a single phase air-core Bi2223 high temperature superconducting transformer, Journal of Physics: Conference Series (JPCS) (2017), printed, 査読有

七戸希, 高温超電導変圧器を用いた小型・軽量電源およびその状態監視システムの開発, 電気評論, 第 101 巻, pp.59-62 (2016), 査読無

N. Nanato, K. Nishiyama, Locating of normal transitions in a Bi2223 high temperature superconducting coil by non-contact voltage measurement method, Cryogenics, Vol. 72, pp. 53-56 (2015), 査読有

〔学会発表〕(計 18 件)

Ryo Kadowaki, Nozomu Nanato, Detection Method of Normal transitions in a High Temperature Superconducting Coil wound with a plurality of YBCO superconductors by the Active Power Method and H-coils, 29th International Symposium on Superconductivity, November 13 - 15, 2016, Tokyo, Japan

Kohei Okura, Nozomu Nanato, Yasunobu Kumagai, Hiroki Aoyama, Locating of Normal Transitions in A Bi2223 High Temperature Superconducting Coil by Using Capacitor Type Voltage Terminals and the Active Power Method, 29th International Symposium on Superconductivity, November 13 - 15, 2016, Tokyo, Japan

Shingo Nakamura, Nozomu Nanato, Shinichi Tanaka, Detection of Normal Transitions in a Hybrid Single-phase Bi2223 High Temperature Superconducting Transformer by using the Active Power Method and a Magnetic Flux Detection Coil, 29th International Symposium on Superconductivity, November 13 - 15, 2016, Tokyo, Japan

Noriyuki Koide, Nozomu Nanato, Takaaki Ono, Takafumi Adachi, Protection System for Normal Transitions in a Single-phase 1 kA Class Bi2223 High Temperature Superconducting Transformer by Using the Active Power Method, 29th International Symposium on Superconductivity, November 13 - 15, 2016, Tokyo, Japan

Noriyuki Kishi, Nozomu Nanato, Yuhi Tanaka, Mikishi Kondo, Development of A large AC Current Supply with A Single-phase Air-core Bi2223 High Temperature Superconducting Transformer, 29th International Symposium on Superconductivity, November 13 - 15, 2016, Tokyo, Japan

熊谷泰伸, 大倉康平, 七戸希, コンデンサ型電圧端子を用いた高温超電導コイルの常電導転移発生位置同定の高分解能化, 平成 28 年度(第 67 回)電気・情報関連学会中国支部連合大会, 2016.10.22, 広島大学

小野孝晃, 小出哲之, 七戸希, 単相 Bi2223 高温超電導変圧器の常電導転移検出における有効電力法の高精度化, 平成 28 年度(第 67 回)電気・情報関連学会中国支部連合大会, 2016.10.22, 広島大学

田中雄飛, 岸紀行, 七戸希, 単相 Bi2223 高温超電導変圧器を用いた交流大電流電源における高調波電流抑制, 平成 28 年度(第 67 回)電気・情報関連学会中国支部連合大会, 2016.10.22, 広島大学

田中慎一, 中村慎吾, 七戸希, 磁束検出コイルを用いた有効電力法によるハイブリッド型単相 Bi2223 高温超電導変圧器の二次巻線における常電導転移検出, 平成 28 年度(第 67 回)電気・情報関連学会中国支部連合大会, 2016.10.22, 広島大学

門脇良, 七戸希, 有効電力法を用いたハイブリッド単相 YBCO 高温超電導変圧器の常電導転移保護システム, 第 17 回 IEEE Hiroshima Student Symposium, 2015.11.21-22, 岡山大学

田中雄飛, 岸紀行, 七戸希, 単相 Bi2223 高温超電導変圧器のインバータ通電における電流ひずみ抑制, 第 17 回 IEEE

Hiroshima Student Symposium,
2015.11.21-22, 岡山大学
小野孝晃, 小出哲之, 七戸希, 单相
Bi2223 高温超電導変圧器を用いた小型
交流大電流電源の開発, 第 17 回 IEEE
Hiroshima Student Symposium,
2015.11.21-22, 岡山大学
田中慎一, 中村慎吾, 七戸希, ハイブリ
ッド单相 Bi2223 高温超電導変圧器を用
いた小型交流大電流電源の開発, 第 17
回 IEEE Hiroshima Student Symposium,
2015.11.21-22, 岡山大学
熊谷泰伸, 大倉康平, 七戸希, コンデン
サ型電圧端子を用いた Bi2223 高温超電
導コイルの常電導転移の発生位置同定,
第 17 回 IEEE Hiroshima Student
Symposium, 2015.11.21-22, 岡山大学
岸紀行, 七戸希, 单相 Bi2223 高温超電
導変圧器のインバータ通電における損
失特性, 平成 27 年度 (第 66 回) 電気・
情報関連学会中国支部連合大会,
2015.10.17, 山口大学
小出哲之, 七戸希, 有効電力法を用いた
单相 Bi2223 高温超電導変圧器の常電導
転移保護システム, 平成 27 年度 (第 66
回) 電気・情報関連学会中国支部連合大
会, 2015.10.17, 山口大学
中村慎吾, 七戸希, 有効電力法を用いた
ハイブリッド单相 Bi2223 高温超電導変
圧器の常電導転移保護システム, 平成 27
年度 (第 66 回) 電気・情報関連学会中
国支部連合大会, 2015.10.17, 山口大学
大倉康平, 七戸希, コンデンサ型電圧端
子を用いた Bi2223 高温超電導コイルの
常電導転移保護システム, 平成 27 年度
(第 66 回) 電気・情報関連学会中国支
部連合大会, 2015.10.17, 山口大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

七戸 希 (NANATO Nozomu)

岡山大学・大学院自然科学研究科・准教授
研究者番号: 80362953